

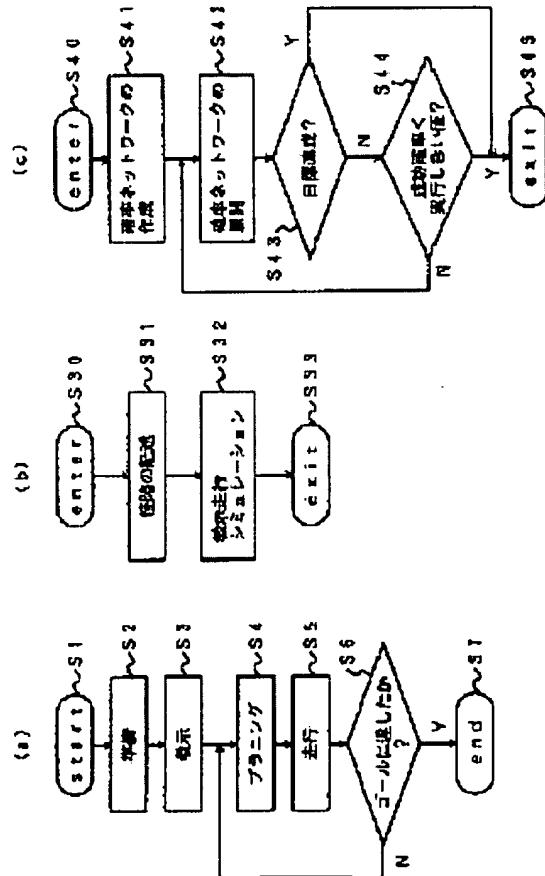
TRAVELING CONTROL METHOD FOR AUTONOMOUS TRAVELING VEHICLE

Patent number: JP10260726
Publication date: 1998-09-29
Inventor: IDOKO TOSHIYUKI; KOBAYASHI MASAMI
Applicant: KAWASAKI HEAVY IND LTD
Classification:
 - **International:** H01H1/02; H01H1/02; (IPC1-7): G05D1/02
 - **European:** H01H1/02C
Application number: JP19970084354 19970318
Priority number(s): JP19970084354 19970318

[Report a data error here](#)

Abstract of JP10260726

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an autonomous traveling method and a traveling control method therefor with which traveling speed is accelerated by decreasing the burden of image processing while effectively utilizing the merit of traveling control method due to a visual servo requiring no self-position measurement and runaway from a traveling route is prevented by easily confirming its own position. **SOLUTION:** This traveling control method using the visual servo is provided with a map expressing the traveling environment of autonomous traveling vehicle land mark and traveling route and a probability network with which nodes expressing the action of autonomous traveling vehicle autonomously traveling on the traveling route through arcs and the value of success probability in the action corresponding to each node or the value of acquisition to be acquired as the result of action allocating calculation expression and execution time is allocated and generated, the action plan to be taken until reaching a prescribed target position is found by expanding the probability network, performance is calculated by finding the expected acquisition value and dividing it with the execution time concerning the action plan, and the plan of maximum performance is selected and executed.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(51)Int.Cl.⁶

G 05 D 1/02

識別記号

F I

G 05 D 1/02

K

P

審査請求 有 請求項の数13 FD (全 15 頁)

(21)出願番号

特願平9-84354

(22)出願日

平成9年(1997)3月18日

(71)出願人 000000974

川崎重工業株式会社

兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号

(72)発明者 井床 利之

千葉県野田市二ツ塚118番地 川崎重工業
株式会社野田工場内

(72)発明者 小林 政己

千葉県野田市二ツ塚118番地 川崎重工業
株式会社野田工場内

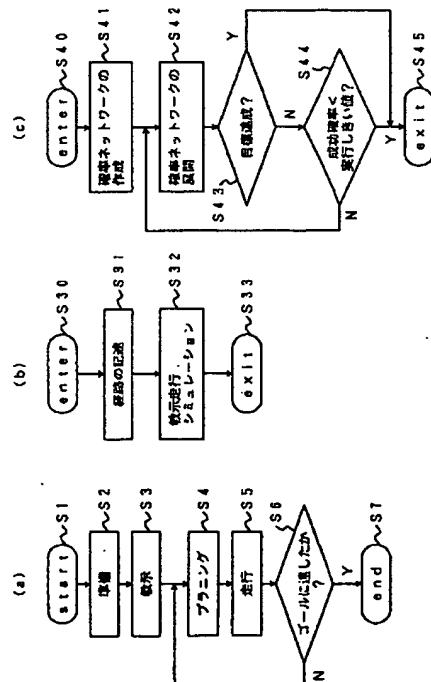
(74)代理人 弁理士 関 正治

(54)【発明の名称】自律走行車の走行制御方法

(57)【要約】

【課題】自己位置計測を必要としないビジュアルサーボによる走行制御法の利点を生かしながら、画像処理の負担を減らし走行速度を上げるとともに、自己位置の確認を行って走行経路からの逸脱を防ぐ自律走行車及びその走行制御方法を提供する。

【解決手段】ビジュアルサーボを用いた走行制御方法であって、自律走行車が走行する環境とランドマークと走行経路を表現した地図と、走行経路を自律走行する自律走行車の行動を表すノードをアークで結び各ノードに対応する行動の成功確率の値もしくは算出式と実行時間を割り当て行動の結果として獲得できる獲得価値を割り当てて生成する確率ネットワークとを備え、所定の目標位置に到達するまでに取り得る行動プランを確率ネットワークの展開によって求め、行動プランについて期待獲得価値を求めて実行時間で割ったパフォーマンスを算出し、パフォーマンスが最大になるプランを選択して、実行する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ティーチングプレイバックによるビジュアルサーボを用いた自律走行車の走行制御方法であつて、
自律走行車が走行する環境とランドマークと走行経路を表現した地図と、走行経路を自律走行する自律走行車の行動を表すノードをアークで結び各ノードに対応する行動の成功確率の値もしくは算出式と実行時間を割り当て行動の結果として獲得できる獲得価値を割り当てて生成する確率ネットワークとを備え、
所定の目標位置に到達するまでに取り得る行動プランを前記確率ネットワークの展開によって求め、該行動プランについて期待獲得価値を求めて実行時間で割ったパフォーマンスを算出し、該パフォーマンスが最大になるプランを選択して、実行することを特徴とする自律走行車の走行制御方法。

【請求項 2】 請求項 1 記載の自律走行車の走行制御方法において、前記パフォーマンスが最大になるプランの成功確率が所定の閾値より小さくなるまで、自律走行車の到達目標位置を先方に延長して前記確率ネットワークの展開を繰り返すことを特徴とする自律走行車の走行制御方法。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載の自律走行車の走行制御方法において、前記確率ネットワークの展開により自律走行車の最終到達目標位置に達するときには、前記算出したパフォーマンスが最大になるプランを選択して、実行することを特徴とする自律走行車の走行制御方法。

【請求項 4】 前記地図が、固定的な障害物の位置を記録した第 1 のレイヤと走行を容易にするために設置するランドマークの位置を記録した第 2 のレイヤと走行経路を表す第 3 のレイヤを重複して生成されるものであることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれかに記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 5】 自律走行車とランドマークの位置関係を知り前記地図を参照して自律走行車の自己位置を推定することを特徴とする請求項 4 記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 6】 前記ノードが、自律走行車が走行することを表す走行ノードと自律走行車がランドマークを観測することを表す観測ノードと自己位置を推定することを表す自己位置推定ノードと目標位置にあることを表す目標位置ノードを含むことを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれかに記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 7】 前記走行ノードの成功確率として、移動精度が低い誘導方法による連続走行距離が長くなると小さくなるように、また自律走行車とランドマークの距離が長くなると小さくなるように、さらにランドマークの検出確率が小さければ小さくなるような走行確率を割り当てるこことを特徴とする請求項 6 記載の自律走行車の走

行制御方法。

【請求項 8】 前記観測ノードの成功確率として、自律走行車とランドマークの距離が長ければ小さくなるように、また自律走行車の進行方向とランドマークを見通す方向の角度が大きければ小さくなる観測確率を割り当てるこことを特徴とする請求項 6 または 7 記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 9】 前記自己位置推定ノードの成功確率として、自己位置推定が成功する確率であつて 2 個のランドマークを利用する場合にそれぞれのランドマークの観測確率の積になるような自己位置推定確率を割り当てるこことを特徴とする請求項 6 から 8 のいずれかに記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 10】 前記走行ノードの獲得価値として、精度の悪い誘導方法による連続走行距離が増加するにつれ精度がよい方の誘導方法による場合の値が増大するような目標到達価値を割り当てるこことを特徴とする請求項 6 から 9 のいずれかに記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 11】 前記自己位置推定ノードの獲得価値として、連続走行距離が長くなるにつれて増加するような自己位置推定価値を割り当てるこことを特徴とする請求項 6 から 10 のいずれかに記載の自律走行車の走行制御方法。

【請求項 12】 撮像装置と駆動モータ制御回路部とステアリング制御回路部とパン台制御回路部を搭載し、画像処理部と動作制御部とプログラミング部と記憶装置からなる制御用計算機を備え、撮像装置がパン台に据えられていて垂直軸の周りに回転できてパン台制御回路部により撮像方向を制御することができ、駆動モータ制御回路部とステアリング制御回路部が後輪と前輪を駆動制御することによりビジュアルサーボにより自走する自律走行車であつて、

記憶部は、自律走行車が走行する環境と走行経路を表現した地図と走行経路を自律走行する自律走行車の行動を表すノードをアークで結び各ノードに対応する行動の成功確率の値もしくは算出式と実行時間を割り当て行動の結果として獲得できる獲得価値を割り当てて生成する確率ネットワークと確率ネットワークの展開に用いる演算式を記憶し、

画像処理部は撮像装置の画像信号出力を入力して画像処理し、結果を動作制御部に伝達し、

動作制御部はプログラミング部および記憶装置と協同し、記憶されたマップ上の走行経路について走行シミュレーションして作成された教示データに基づいて、所定の目標位置に到達するまでに取り得る行動プランを前記確率ネットワークの展開によって求め、該行動プランについて期待獲得価値を求めて実行時間で割ったパフォーマンスを算出し、該パフォーマンスが最大になるプランを選択して、これに対応する制御信号を駆動モータ制御回路部とステアリング制御回路部とパン台制御回路部に出力

し、

駆動モータ制御回路部は後輪を制御して車両を前進後退させ、ステアリング制御回路部は前輪を制御して車両の方向を定め、パン台制御回路は撮像装置の向きを制御して環境情報を取得させることを特徴とする自律走行車。

【請求項13】 前記制御用計算機が前記自律走行車の外に設備されていて、撮像装置からの映像信号と走行制御部からの制御信号が無線で伝達されることを特徴とする請求項12記載の自律走行車。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、点検・保守・搬送などの作業を行うために無人で自律的に移動する走行車に係り、特に視覚センサを使用した自律走行車の走行を制御する方法に係る。

【0002】

【従来の技術】工場や倉庫などで点検、保全、運搬などを行うため予め決めた経路に沿って自律走行する走行車が多用されるようになってきた。このような場合に、レールを敷いて自律走行車の経路とするのではなく、設置費用が掛かるばかりでなく経路の変更も容易でない。そこで、必要に応じて容易に経路を変更でき、設定した経路を忠実にかつ高速に走行できる走行車の開発が望まれている。しかも経路の設定や教示が簡単にできることが必要とされる。このため、適当な位置にランドマークを設置して、これらランドマークを基準にした走行経路を設定して走行車制御装置に教示し、内界センサ等で自己の位置を確認しつつCCDカメラ等の視覚センサによりランドマークを観測しながら教示経路をたどる、いわゆるティーチングプレイバックと呼ばれる走行制御技術が開発されている。

【0003】 視覚センサを使用した自律走行車両の走行制御法として、例えば、三河他「ビジュアルサーボを用いた自律移動ロボットの制御」第11回日本ロボット学会学術後援会予稿集1309から1310頁に、予め走行経路に沿って走行目印あるいはランドマークを設置しておいて、CCDカメラなどの視覚センサを搭載した走行車を所望の走行経路に沿って実際に走行させ、そのとき走行車の視覚センサで観測されたランドマークの見え方を記憶しておく、その後の自動走行ではランドマークの見え方が記憶されたとおり再現されるように走行車のステアリングと駆動モータを制御する、いわゆるティーチングプレイバックを原則としたビジュアルサーボと呼ばれる方法が提案されている。ビジュアルサーボは内界センサによる自己位置計測を必要としない点で、よく用いられるデッドレコニングより優れているが、画像処理による負担が大きいため一般的に走行速度が遅く、また画像処理による環境認識の難しさのため一旦教示経路からはずれると自己位置の推定が難しく正しい経路上に復帰することが困難になる。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】そこで、本発明の解決しようとする課題は、自己位置計測を必要としないビジュアルサーボによる走行制御法の利点を生かしながら、画像処理の負担を減らし走行速度を上げるとともに、自己位置の確認を容易に行って走行経路からの逸脱を防ぐ自律走行車及びその走行制御方法を提供することである。

【0005】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため、本発明の自律走行車の走行制御方法は、ビジュアルサーボを用いた走行制御方法であって、自律走行車が走行する環境とランドマークと走行経路を表現した地図と、走行経路を自律走行する自律走行車の行動を表すノードをアークで結び各ノードに対応する行動の成功確率の値もしくは算出式と実行時間を割り当て行動の結果として獲得できる獲得価値を割り当てて生成する確率ネットワークとを備え、所定の目標位置に到達するまでに取り得る行動プランを確率ネットワークの展開によって求め、行動プランについて期待獲得価値を求めて実行時間で割ったパフォーマンスを算出し、パフォーマンスが最大になるプランを選択して、実行することを特徴とする。

【0006】 走行環境の概略構造とランドマークの位置を記した地図を用いて、教示経路を地図上に与え、シミュレーションによって得られるランドマークの見え方を教示データとして使用することができる。従って、実際の走行を行わなくても教示データを得ることができ教示工程が簡単である。また、走行車の自己位置はランドマークの位置関係を観測することによって地図を参照して推定することができるため、走行車に位置姿勢を測定するための内界センサを設備しなくとも、教示経路から外れたときに自己位置を確認することができる。また、地図を通して走行車の位置を操作者に知らせるように構成することができる。可能な行動プランを、ランドマーク観測の精度、走行の信頼性、環境変化の程度などを確率的に表現して確率ネットワークとして表すことができるため、1ステップ毎にそれぞれのプランを展開してその成功確率と期待獲得価値を計算しパフォーマンスの大きいプランを選択すれば、与えられたシステム、環境に応じて高速かつ正確に効率的な自律走行車の誘導ができる。

【0007】 特に、パフォーマンスが最大になるプランの成功確率が所定の閾値より小さくなるまで、自律走行車の到達目標位置を先方に延長して確率ネットワークの展開を繰り返すようにすることができる。また、確率ネットワークの展開により自律走行車の最終到達目標位置に達するときには、パフォーマンスが最大になるプランを選択して、直ちに実行するようにしてもよい。なお、地図は、固定的な障害物の位置を記録した第1のレイヤ

と走行を容易にするために設置するランドマークの位置を記録した第2のレイヤと走行経路を表す第3のレイヤを重畳して生成されるものであり、自律走行車とランドマークの位置関係を知り地図を参照して自律走行車の自己位置を推定することができる。また、確率ネットワークのノードは、自律走行車が走行することを表す走行ノードと自律走行車がランドマークを観測することを表す観測ノードと自己位置を推定することを表す自己位置推定ノードと目標位置にあることを表す目標位置ノードを含むようになることが好ましい。

【0008】そして、走行ノードの成功確率として、移動精度が低い誘導方法による連続走行距離が長くなると小さくなるように、また自律走行車とランドマークの距離が長くなると小さくなるように、さらにランドマークの検出確率が小さければ小さくなるような走行確率を、観測ノードの成功確率として自律走行車とランドマークの距離が長ければ小さくなるように、また自律走行車の進行方向とランドマークを見通す方向の角度が大きければ小さくなる観測確率を、自己位置推定ノードの成功確率として、自己位置推定が成功する確率であって2個のランドマークを利用する場合にそれぞれのランドマークの観測確率の積になるような自己位置推定確率を割り当てるようにすることができる。さらに、走行ノードの獲得価値として、精度の悪い誘導方法による連続走行距離が増加するにつれ精度がよい方の誘導方法による場合の値が増大するような目標到達価値を、また自己位置推定ノードの獲得価値として、連続走行距離が長くなるにつれて増加するような自己位置推定価値を割り当てるようにしてよい。このようにして、標準的な状態では最も高速に移動できる行動プランを採用し、連続走行が長くなると自動的に自己位置推定を行って位置の確認を行うプランを採用し、精度の悪い誘導方式による走行が長くなると自己位置推定や精度の良い方の誘導方法を選択するプランを採用し、また、地図が不確定なときや環境の変化が激しいときには浅いプランニングをして頻繁に再評価を行うようにするなど、合理的な行動の選択をすることができる。

【0009】また、本発明の自律走行車は、撮像装置と駆動モータ制御回路部とステアリング制御回路部とパン台制御回路部を搭載し、画像処理部と動作制御部とプランニング部と記憶装置からなる制御用計算機を備え、撮像装置がパン台に据えられていて垂直軸の周りに回転できてパン台制御回路部により撮像方向を制御することができ、駆動モータ制御回路部とステアリング制御回路部が後輪と前輪を駆動制御することにより自走する自律走行車であって、自律走行車が走行する環境と走行経路を表現した地図と走行経路を自律走行する自律走行車の行動を表すノードをアーチで結び各ノードに対応する行動の成功確率の値もしくは算出式と実行時間を割り当て行動の結果として獲得できる獲得価値を割り当てて生成する

確率ネットワークと確率ネットワークの展開に用いる演算式を記憶し、撮像装置の画像信号出力を入力して画像処理した結果を動作制御部に伝達し、動作制御部はプランニング部および記憶装置と協同し、記憶されたマップ上の走行経路について走行シミュレーションして作成された教示データに基づいて、所定の目標位置に到達するまでに取り得る行動プランを確率ネットワークの展開によって求め、それぞれの行動プランについて期待獲得価値を求めて実行時間で割ったパフォーマンスを算出し、パフォーマンスが最大になるプランを選択して、これに対応する車輪と撮像装置の制御をすることを特徴とする。なお、制御用計算機を自律走行車の外に設備して、撮像装置からの映像信号と走行制御部からの制御信号を無線で伝達するようにしてもよい。

【0010】

【発明の実施の形態】以下、本発明に係る自律走行車および走行制御方法を、図面を用い実施例に基づいて詳細に説明する。図1は本発明の自律走行車の実施例の構成を表すブロック図、図2は本発明の制御方法の処理手順を表す流れ図、図3は走行制御に用いるマップの概念を表す図面、図4は制御アルゴリズムに用いる確率ネットワークの概念を説明する図面、図5は走行経路の例を示す平面図、図6は図5の走行経路に沿ったランドマークの見え方を例示するグラフ、図7は図5の走行経路についての確率ネットワークを示す線図、図8は図7の確率ネットワークを標本空間に展開したもの、図9は図8に展開されたパス毎のパフォーマンス計算結果を表すグラフである。

【0011】本実施例の自律走行車1は撮像装置としてCCDカメラ3を頂部に載せた搬送車両で、画像処理部11と動作制御部13とプランニング部15と記憶装置17からなる制御用計算機5を搭載し、駆動モータ制御回路部7とステアリング制御回路部9を介して前輪と後輪を駆動制御することにより、自走するようになっている。また、CCDカメラ3はパン台21の上に据えられていて垂直軸の周りに回転できるようになっており、パン台制御回路部9により自在に撮像方向を制御することができる。画像処理部11はCCDカメラ3の画像信号出力を入力して画像処理し、結果を動作制御部13に伝達する。動作制御部13はプランニング部15および記憶装置17と協同し、記憶されたマップ上の走行経路について走行シミュレーションして作成された教示データに基づいて、動作のプランニングと実際の走行を繰り返すことにより教示経路に沿った自律走行をして走行車1を最終目標位置に到達させる。

【0012】ここで、プランニングとは、予め予測される動作とその成功確率および動作間の因果関係を表した確率ネットワークに基づき、各動作について割り当てられた獲得価値と実行時間の情報を使って、可能なパスすなわち動作順序のプランについて算出する期待獲得価値を

判断基準として、実行すべき動作を決定する作業をいう。実行すべき動作が決定されると、動作制御部13からの制御信号がそれぞれ駆動モータ制御回路部7とステアリング制御回路部9およびパン台制御回路23に伝達される。駆動モータ制御回路部7は後ろの駆動輪を制御して車両を前進後退させ、ステアリング制御回路部9は前輪を制御して車両の方向を定める。パン台制御回路23はCCDカメラ3の向きを制御して取得する画像範囲を決める。なお、自己位置は予め記憶したマップと走行経路に沿って設けられているランドマークの観測結果から推定することができる。

【0013】制御用計算機5で実行される制御アルゴリズムを図2から図9を用いて詳細に説明する。図2の(a)は本発明の処理手順の全体を表すフローチャート、(b)は教示工程を表すフローチャート、(c)はプランニングの工程を表すフローチャートである。制御プログラムを走らせる前に、走行環境の整備を含めた準備が必要である(S2)。まず、走行経路に沿って走行目印すなわちランドマークを設置する。ランドマークは、特定のマークや数字が描かれたもの、光を発生するもの、光の反射シートが貼られたものなど、画像処理による認識が簡単にできるものが使用される。また、走行環境を表す地図を準備する。地図は施設設計図面などを基にして作成し、記憶装置17に記憶する(S2)。地図は、図3に示すように3層構造を持ち、レイヤ1には走行環境の概略構造を、またレイヤ2にはランドマークの概略位置をピットマップなどの形式で記述したもので、さらにレイヤ3に走行経路を記述できるようにしてあり、パソコンなどで作成することが可能である。レイヤ1に記述する走行環境の概略構造は壁や構造物の配置など固定的な条件を表すが、レイヤ2に記述するランドマークは自律走行車1のために設置されるもので自律走行の必要に従って変更する場合がある。

【0014】準備が整えば、自律走行すべき経路とその経路をたどるために必要な情報を教示する(S3)。教示S3のルーチンを図2(b)に示す。教示S3では、まず自律走行させたい経路を準備工程S2で作製した地図に記述する(S31)。この経路はパソコンの作図ソフトなどを使ってレイヤ3上にマウスなどで記述し、ピットマップなどのデータ形式に変換した後、スプライン近似や最小自乗近似などにより車両が走行可能な滑らかな曲線に修正して、走行車の教示経路データとする。次に、走行経路が書き込まれた地図を用いて走行シミュレーションを行い、そのとき走行車に搭載された視覚センサから観測されるランドマークのカメラ画像中の位置を記録し、自律走行の際に用いる教示データとする(S32)。

【0015】自律走行のためには、まず、プランニングを行う(S4)。プランニングS4のルーチンを図2(c)に示す。プランニングS4では、初めに想定されるプラン

ングパターンを図4に示したような確率ネットワークに変換する(S41)。確率ネットワークはノードとアーケで構成される。ノードは走行車の行動や状態を表し、アーケはノード間の因果関係を表す。自律走行は、自己を取り巻く環境の状態を確認し、設定した経路を走行して目標の位置に到達することを目的とする。確率ネットワークは、このような自律走行のために取りうる動作と動作間の因果関係を記述するもので、実際に取るべき動作の順序を確定するために使用される。アーケは、2個のノードの表現する事象が直接の因果関係あるいは順序関係を有するときに向きを持った矢印で表すものである。

【0016】ノードには、行動を表す走行ノード、自己位置推定ノード、観測ノードと、状態を表す目標位置ノードがある。走行ノードは、ビジュアルサーボにより走行することを表す。1個のランドマークを使って走行車を制御する1ランドマーク利用型と、2個のランドマークを同時に利用して走行車を誘導する2ランドマーク利用型がある。1ランドマーク利用型は画像処理にかかる負担は比較的小さいが、走行車の位置や姿勢を正確に制御することが困難であり、2ランドマーク利用型は1ランドマーク利用型よりも画像処理にかかる負担は大きいが走行車の位置・姿勢を正確に制御することが可能である。自己位置推定ノードは、走行車が停止した状態でランドマークを観測し地図と照らし合させて自己位置を推定することを表す。観測ノードは、特定のランドマークを観測することを表す。目標位置ノードは、走行車がその時々の目標位置に存在することを表す。

【0017】各ノードにはそれぞれ確率が割り当てられる。走行ノードには走行確率が割り当てられる。走行確率は、ビジュアルサーボによって目標位置に達することができ成功する確率をいう。走行確率は走行車の制御の信頼性と地図の正確さに依存する。なお、走行環境変化の程度を表す持続確率に依存するように設定することが好ましい。また、1ランドマーク利用型と2ランドマーク利用型では走行確率は異なる。持続確率は、観測しているランドマークが人間などの移動障害物によって隠蔽されない確率をいい、環境の変化の度合いを表す。観測確率は、ある特定のランドマークの観測が成功する確率で、画像処理の信頼性を表す。

【0018】持続確率、観測確率、走行確率は、走行車の制御精度、地図の正確さ、環境変化の度合い、制御用計算機の処理能力などを考慮して設定される。例えば、以下のように設定することができる。持続確率Pr-Lは、対象とする環境において予想される変化の度合いに応じて選択される定数を用いて設定される。たとえば観測中にランドマークが移動障害物によって隠蔽されない確率Pmにより代表しても良い。観測確率Pr-Oは、例えば、走行車とランドマークとの距離が長ければ小さくなり、また走行車の進行方向からの見たランドマークの方向角が

大きければ小さくなるように、下の式（1）に従って設定するようにしてよい。

$$Pr-0 = 1 - u1 \cdot (\text{Ang} * C1 + \text{Dist} * C2) \quad (1)$$

ここで、Angは地図から推定する走行車の進行方向から見たランドマーク方向角、Distは地図から推定する走行車からランドマークまでの距離、u1、C1、C2はそれぞれ定数である。

【0019】また、走行確率Pr-Rは、例えば1ランドマーク利用型ビジュアルサーボによる場合について、連続走行距離が長くなったり走行車とランドマークとの距離が長くなると走行確率が小さくなるように、また持続確率が小さければ小さくなるように、下の式（2）に従って設定することができる。

$$Pr-R = \{1 - u2 \cdot (\text{Int1} * C3 + \text{Dist} * C4)\} * Pr-L \quad (2)$$

ここで、Int1は1ランドマーク利用型ビジュアルサーボによる連続走行距離、u2、C3、C4はそれぞれ定数である。

【0020】自己位置推定確率は、自己位置推定が成功する確率である。2個のランドマークを使用して自己位置推定を行う場合はそれぞれのランドマークの観測確率の積となる。自己位置の計算は式1に従って行うことができる。

【0021】
【数1】

$$\begin{aligned} {}^wP_c &= {}^wP_t - {}^wR_c \cdot {}^cP_t \\ h_f &= f \cdot {}^c y_t / {}^c x_t \\ v_f &= -f \cdot {}^c z_t / {}^c x_t \end{aligned} \quad] \quad (3)$$

ただし、
 wP_c : ワールド座標系でのカメラの位置 (${}^w x_c, {}^w y_c, {}^w z_c$)
 wP_t : ワールド座標系でのランドマークの位置 (${}^w x_t, {}^w y_t, {}^w z_t$)
 cP_t : カメラ座標系でのランドマークの位置 (${}^c x_t, {}^c y_t, {}^c z_t$)
 h_f : カメラ画像でのランドマークのH座標
 v_f : カメラ画像でのランドマークのV座標
 wR_c : 座標変換行列

$${}^wR_c = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha & -\cos \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

ここで、 α : カメラのパレ角（ワールド座標系でのカメラの向き）
 β : カメラのチルト角（ワールド座標系でのカメラの仰角）

【0022】いま、CCDカメラの高さ wZ_c が既知の定数、ワールド座標系でのランドマークの位置 (${}^w x_t, {}^w y_t, {}^w z_t$) が既知の定数、カメラのチルト角 β とレンズ焦点距離 f がいずれも既知の定数であり、カメラ画像でのランドマークの水平座標と垂直座標 (h_f, v_f) が観測により得られるものとすると、式（3）において未知数が ${}^w x_c, {}^w y_c, \alpha, {}^c x_t, {}^c y_t, {}^c z_t$ の6個に対して式の数が5個になる。そこで、2個のランドマークを観測して式（3）を適用することにより、未知数が ${}^w x_c, {}^w y_c, \alpha, {}^c x_{t1}, {}^c y_{t1}, {}^c z_{t1}, {}^c x_{t2}, {}^c y_{t2}, {}^c z_{t2}$ の9個となるのに対して10個の式が成立するから走行車の位置が推定できる。

【0023】さらに、各ノードには獲得価値 v と実行時間 e_t が割り当てられる。獲得価値 v は、各ノードに対応するだけ早く目標地点に到達する。

【0024】目標到達価値については、例えば、1ランドマーク利用型ビジュアルサーボの目標到達価値 $Vg1$ を定数とし、2ランドマーク利用型ビジュアルサーボを、精度の悪い1ランドマーク利用型誘導方法による連続走行距離が増加するにつれて目標到達価値 $Vg2$ が増加するようにするため、式（4）と式（5）のように設定することができる。

$$Vg1 = \text{定数} \quad (4)$$

$$Vg2 = C7 * \text{Int1} + Vg1 \quad (5)$$

連続走行距離が長くなるにつれて増加するように設定することができる。

【0025】マーク利用型ビジュアルサーボによる連続走行距離、C6

は定数である。

【0025】次に、確率ネットワークを1ステップずつ標本空間に展開する(S42)。確率ネットワークの展開(S42)では、まず、確率ネットワークの形で示された動作の因果関係に基づいて、走行車の現在の行動を示すノードを起点として次の目標ノードに到達するまでに取りうる全てのパスを抽出する操作を行う。こうして抽出されたパスが走行制御における行動の順序を表すプランを表すことになる。次に、各プラン毎にその成功確

$$SP = \Pr(N_1, N_2, N_3, \dots, N_n)$$

$$E = \Pr(N_1) * V_1 + \Pr(N_1, N_2) * V_2 + \dots + \Pr(N_1, N_2, \dots, N_n) * V_n$$

$$P_f = \sum E / \sum v_i$$

ここで、 $N_i (0 \leq i \leq n)$ はノードを表し、 $V_i (0 \leq i \leq n)$ はそれぞれの価値を表す。また、 $\Pr(A_1, A_2)$ はA1が起こったという条件の下でA2が起こる条件付き確率を表す。

【0027】確率ネットワークの展開において、走行車が最終目標点に到達して目標が達成されるものであればプランニングを完了して(S43)、そのプランに従った走行工程(S5)に移る。また、最終目的を達成しない場合は、パフォーマンス最大のプランの成功確率を閾値と比較する(S44)。このプランの成功確率が一定値以下になる場合には、その位置でプランニングを続けて良い結果を得ることができないので、その時点における期待獲得価値最大のプランを実行する。成功確率が高い場合は、次のステップまで確率ネットワークの展開を繰り返して、最終目標地点に到達するまでに取るべき制御行動を見極める。

【0028】走行工程S5では、制御用計算機5の動作制御部13によりCCDカメラ、駆動輪、ステアリングホイールが、選択されたパスに従った順序で制御されて、走行車1が教示された走行経路に沿って走行する。このようにプランニング4と走行5を最終目標位置に達するまで繰り返すことで、教示経路に沿った自律走行が実現される。

【0029】本発明の適用例を、図5から図9を用いて説明する。図5は、地図の作成例を示している。地図には壁などの移動しない障害物101、複数のランドマーク103、教示経路105が記述されている。図7中の四角形100はシミュレーション中の各段階における走行車の位置と姿勢を表す。走行車は経路105に沿い、G0の位置から走行を始めて、G1、G2、G3を経由し最終の目標地点G4に到達する。図6は、図5の地図を用いた走行シミュレーションにより求められた、走行車に搭載されたカメラから観測できるランドマークの状態を示す図面である。走行車がG0とG1の間にある間はL1の位置に設置されたランドマーク103を観測することができ、G1

率と期待獲得価値を計算し、実行時間の合計で割った単位時間当たりの期待獲得価値をもつてパフォーマンスの高いいくつかのプランを選択して展開を繰り返す。

【0026】たとえば、プランPがノードN1、N2、N3、…Nnを繋ぐものであるとして、プランPの成功確率SP、期待獲得価値E、パフォーマンスPfは、それぞれ下の式(7) (8) (9)により求めることができる。

$$(7)$$

$$(8)$$

$$(9)$$

とG2の間ではL1とL3のランドマーク103が観測できる。また、走行シミュレーションにより走行車が教示経路を走行したときにそれぞれのランドマークが画像上に描く軌跡が計算できる。この軌跡をビジュアルサーボの走行制御に用いる。

【0030】図7は、図5において走行車がG1にいるときにG2の位置に到達するまでのパスを表す確率ネットワークの例である。図7の確率ネットワークには、図5中の地点G1からG2までの間に実行しうる全ての行動が記述されている。図7ではノードを<>で、アーチを矢印で表現しており、<Gi>は目標位置ノード、<PE, Gi>は自己位置推定ノード、<ob(Li)>は観測ノード、<VS1(Li), Gj>は1ランドマーク利用型走行ノード、<VS2(Li, Lj), Gk>は2ランドマーク利用型走行ノードである。図8は図7の確率ネットワークを標本空間に展開したものである。図8には、地点G1からG2までの経路中取りうる手順、パス1からパス6が網羅されている。なお、2ランドマーク利用型ビジュアルサーボは2個のランドマークL1、L3を共に観測しなければならないが、この例では、常にL1のランドマークをL3より先に観測するという制約を科すことによりケースを整理して簡単化している。

【0031】各ノードにはそれぞれ先に説明した確率、獲得価値、実行時間が割り振られている。各ノードに割り当てられた数値と算出式および与えられたパラメータに基づき、展開された各パスについて成功確率、期待獲得価値、パフォーマンスが計算される。これらの設定値や算出式は、走行車の特性や置かれる環境および制御の評価関数をどうするかなどにより、選択される。設定値や計算式は記憶装置に格納されて、動作制御装置での演算に必要になると読み出されて利用される。以下の表はその例を表したものである。

【0032】

【表1】

【表2】

バラメータの説明		
記号	意味	計算式
c1	定数	-
c2	定数	-
c3	定数	-
c4	定数	-
c5	定数	-
c7	定数	-
u1	定数	-
u2	定数	-
v1	ランドマーク1つ利用型ビジュアルサーボ走行の係数	-
v2	ランドマーク2つ利用型ビジュアルサーボ走行の係数	$c7 \cdot int1 + v1$
vp	自己位置推定係数	$c8 \cdot int2$
pm	観測中のランドマークが移動障害物などによって隠蔽されない確率(持続確率)	-
o(PE)	自己位置推定に必要な時間	-
o(int)	1つのランドマークを観測するのに必要な時間	-
o(VS1)	ランドマーク1つ利用型ビジュアルサーボによって単位距離あたり走行するのに必要な時間	-
o(VS2)	ランドマーク2つ利用型ビジュアルサーボによって単位距離あたり走行するのに必要な時間	-
ang1	走行車直進方向からのランドマーク1の向き	-
ang3	走行車直進方向からのランドマーク3の向き	-
dist1	走行車からランドマーク1までの距離	-
dist3	走行車からランドマーク3までの距離	-
int1	ランドマーク1つ利用型ビジュアルサーボによる追跡走行距離	-
int2	ランドマーク1つ利用型および2つ利用型ビジュアルサーボによる追跡走行距離	-
Pr((RF, 0))	位置G1における自己位置推定の成功確率	$Pr(\langle ob([1]), G1 \rangle) \cdot Pr(\langle ob([3]), G1 \rangle)$
Pr(<ob([1]), G1>)	位置G1におけるランドマーク1の観測の成功確率(範囲確率)	$1 - j((Ang1 \cdot c1) \cdot dist1 \cdot c2)$
Pr(<ob([3]), G1>)	位置G1におけるランドマーク3の観測の成功確率(範囲確率)	$1 - j((Ang3 \cdot c1) \cdot dist3 \cdot c2)$
Pr(VS1([1]), G1))	位置G1からランドマーク1を用いて行うビジュアルサーボ走行の成功確率	$(1 - o2(int1 \cdot c3)) \cdot pm$
Pr(VS1([3]), G1))	位置G1からランドマーク3を用いて行うビジュアルサーボ走行の成功確率	$(1 - o2(int3 \cdot c3)) \cdot pm$
Pr((VS12([1][3], G1))	位置G1からランドマーク1, L3を用いて行うビジュアルサーボ走行の成功確率	$(1 - o2(int1 \cdot c3 + int3 \cdot c3)) \cdot pm$

	成功確率
バス 1 (pass 1)	$SP1=Pr(\langle PE, G1 \rangle)^t Pr(\langle ob(L1), G1 \rangle)^t Pr(\langle VS1(L1), G1 \rangle)$
バス 2 (pass 2)	$SP2=Pr(\langle PE, G1 \rangle)^t Pr(\langle ob(L3), G1 \rangle)^t Pr(\langle VS1(L3), G1 \rangle)$
バス 3 (pass 3)	$SP3=Pr(\langle PE, G1 \rangle)^t Pr(\langle ob(L1), G1 \rangle)^t Pr(\langle ob(L3), G1 \rangle)^t Pr(\langle VS2(L1L3), G1 \rangle)$
バス 4 (pass 4)	$SP4=Pr(\langle ob(L1), G1 \rangle)^t Pr(\langle VS1(L1), G1 \rangle)$
バス 5 (pass 5)	$SP5=Pr(\langle ob(L3), G1 \rangle)^t Pr(\langle VS1(L3), G1 \rangle)$
バス 6 (pass 6)	$SP6=Pr(\langle ob(L1), G1 \rangle)^t Pr(\langle ob(L3), G1 \rangle)^t Pr(\langle VS2(L1L3), G1 \rangle)$

【表 3】

	期待獲得価値	実行時間
バス 1 (pass 1)	$Pr(\langle PE, G1 \rangle)^t Vp + SP1^t Vg1$	$et(PE) + et(ob) + et(VS1)$
バス 2 (pass 2)	$Pr(\langle PE, G1 \rangle)^t Vp + SP2^t Vg1$	$et(PE) + et(ob) + et(VS1)$
バス 3 (pass 3)	$Pr(\langle PE, G1 \rangle)^t Vp + SP3^t Vg2$	$et(PE) + 2^t et(ob) + et(VS2)$
バス 4 (pass 4)	$SP4^t Vg1$	$et(ob) + et(VS1)$
バス 5 (pass 5)	$SP5^t Vg1$	$et(ob) + et(VS1)$
バス 6 (pass 6)	$SP6^t Vg2$	$2^t et(ob) + et(VS2)$

【表 4】

	例1	例2	例3	例4	例5
c1	1	←	←	←	←
c2	1	←	←	←	←
c3	0.1	←	←	←	←
c4	1	←	←	←	←
c5	1	←	←	←	←
c7	1	←	←	←	←
u1	0.002	←	←	←	←
u2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.01
Vg1	10	←	←	←	←
Vg2	10	←	←	←	←
持続確率	1	1	1	0.6	1
et(PE)	5	←	←	←	←
et(ob)	1	←	←	←	←
et(VS1)	20	←	←	←	←
et(VS2)	50	←	←	←	←
ang1	5	—	—	—	—
ang3	50	←	←	←	←
dist1	8	←	←	←	←
dist3	18	—	←	←	←
int1	0	0	20	0	0
int12	0	20	0	0	0
Vp	0	20	0	0	0
Pr(PE, G1)	0.948	0.948	0.948	0.948	0.948
Pr(ob(L1))	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984
Pr(ob(L3))	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963
Pr(VS1(L1))	0.984	0.984	0.98	0.59	0.92
Pr(VS1(L3))	0.984	0.984	0.96	0.578	0.82
Pr(VS12(L1L3))	0.974	0.974	0.97	0.351	0.87

【0033】表1は、これら数値の算出に用いられるパラメータの意義と算出に用いる計算式を説明するものである。上段に示した定数、獲得価値や実行時間と地図から得られる角度や距離、また走行履歴から決まる走行距離などを用いて、下段に示した計算式により成功確率を算出する。表2は、図8に展開した各バス毎の成功確率の算定式をまとめたものである。あるバスの成功確率は、バスに含まれる事象の成功確率の積になる。表3は、各バス毎の期待獲得価値と実行時間の算出式をまとめたものである。表4は、上記事例について、5個のケースを設定して具体的なパラメータを決定し、ノードそれぞれについて算定式に基づいて求めた成功確率をまとめたものである。

【0034】図9は、上記結果に基づいて各セット毎に各バスのパフォーマンスを求めた結果を、横軸にバス番号、縦軸にパフォーマンスをプロットした折れ線グラフに表したもので、セット番号をパラメータとしている。計算例1は標準的なパラメータセット例を用いた走行開始時期における計算例であって、このときはバス4のパフォーマンスが最も高い。このパラメータセットは、自

律走行のスタート時など走行車の位置が正確に決められることを前提にしたもので、走行車の最も近くにあるランドマークL1を利用した1ランドマーク利用型ビジュアルサーバー走行により目標地点まで移動するようなプランが適当であることを意味する。計算例2は、ビジュアルサーバーによる連続走行距離が長い状態であって走行履歴から決まるInt12が大きい場合におけるプランニングの例で、このときはバス1のパフォーマンスが最も高い。連続走行距離が増えると自動的に自己位置推定を行うようなプランが適当であることを意味する。

【0035】計算例3は、1ランドマーク利用型ビジュアルサーバーによる連続走行距離が長くてInt1が大きくなったときのプランニング例で、このときはバス6のパフォーマンスが最も高い。これは、1ランドマーク利用型ビジュアルサーバーによる走行が続いているときは、2個のランドマークを利用して2ランドマーク利用型ビジュアルサーバーによる走行を行うようなプランが良いという意味である。1ランドマーク利用型ビジュアルサーバーでは姿勢制御が行えないため、この方法による走行距離が長くなったときは自己位置推定か2ランドマーク利用型ビ

定数

地図より計測

走行履歴

計算により
得られる

ジアルサーボ走行による姿勢の制御を行うプランを立てることが適当である。なお、この場合に自己位置推定と2ランドマーク利用型走行のいずれを選択すべきかは、それぞれに設定された実行時間や獲得価値によって異なる。

【0036】計算例4は持続確率を低く設定した場合の計算例である。このときは全てのパスにおける成功確率が低下し、パフォーマンスも低減している。これは、走行環境の状態が変化しやすいときは先の行動まで決めるような深いプランを立てずに、浅いプランニングを頻繁に行って状況の変化に対応しながら自律走行するようなプランが適当であることを意味する。計算例5は、パラメータu2を大きくして走行確率を低く設定した場合の計算例である。このときにも全てのパスにおける成功確率が低下し、パフォーマンスも低減している。これは、地図の正確度が低いときも深いプランを立てずに、浅いプランニングを頻繁に行って状況を把握しながら自律走行するようなプランが適当であることを意味する。

【0037】このように、本発明の走行制御方法によって、走行状態や走行環境の変化程度や与えられたシステムの状態に応じて、走行速度、移動精度のいずれの面から見ても効率の良い最適な移動や自己位置計測ができるプランニングが可能となる。なお、本発明によれば、走行車が教示経路から外れた場合でも、走行車がランドマークを観察できる位置まで誘導してやれば、その地点で自己位置を推定することができるので自律走行を継続することができる。また、地図を介して走行車の位置を操作者に報知することができる。さらに、教示データを作成する際に実際に走行車を走行させる必要がない。

【0038】図10と図11は本発明の自律走行車の別の実施例を示すブロック図である。図10は走行車の構成を表すブロック図、図11は制御用計算機とその付属物の構成を表すブロック図である。図中の参照番号は図1と同じ機能を表すものについては同じ番号を用いて細かい説明を省略する。この実施例が図1の実施例と異なる点は、制御用計算機が走行車自体に搭載されないで、電波信号を用いたラジオコントロールにより信号を授受して遠隔で制御できるようにしたことである。

【0039】本実施例の自律走行車1は撮像装置3を頂部に載せ、撮像装置3の画像信号出力は画像送信機31と画像受信機37を介して中央制御室等に設置された制御用計算機5の画像処理部11に送信される。像処理部11は撮像装置3からの画像信号を画像処理し、結果を動作制御部13に送る。動作制御部13はプランニング部15および記憶装置17と協同し、先に説明した実施例におけると同じように、マップ上の走行経路について走行シミュレーションして作成された教示データに基づいて動作のプランニングを行い、走行制御を行う。制御信号は制御用計算機5に付属するラジオコントロール信号送

信機39と走行車1に搭載されたラジオコントロール信号受信機33を介して走行車1中のラジオコントロール制御回路部35に伝達される。

【0040】ラジオコントロール制御回路部35は、さらに、駆動モータ制御回路部7とステアリング制御回路部9に制御信号を伝え、これらの制御回路部がそれぞれ前輪と後輪を駆動制御することにより、走行車1が教示された経路に沿って自走するようになっている。また、撮像装置3はパン台21上に据えられており、パン台制御回路部9により自在に撮像方向を制御して、必要なランドマーク画像を得ることができる。この実施例によれば、車両毎に制御用計算機を搭載する必要がないから、走行車の価格が低廉化しました可載重量が増加する。さらに、1基の制御用計算機で複数の走行車を同時に制御することができ、また条件によっては制御用計算機の部分は工場に既存のものの一部を利用することも可能であるので、全体システムが極めて経済的に構成できるようになる。

【0041】以上の実施例についての説明は、工場内を自律走行する運搬車に適用する場合を例にとって行ったが、保全用の無人作業車あるいは点検用の自動測定車などに適用する場合でも、全く同じ構成で本発明の自律走行車と走行制御方法の実施ができるることはいうまでもない。

【0042】

【発明の効果】以上詳細に説明した通り、本発明の自律走行車と走行制御方法によれば、複雑な工場内経路において自律走行させる場合にも、実際に走行させずに教示経路データを容易に形成し、内界センサを持たないにもかかわらず走行車の自己位置を正確に推定し、しかも走行車を教示経路に忠実にかつ高速に走行させるようにすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の自律走行車の実施例の構成を表すブロック図である。

【図2】本発明の自律走行車における走行制御方法の処理手順を表す流れ図である。

【図3】本発明の走行制御に用いるマップの概念を表す図面である。

【図4】本発明の自律走行車の制御アルゴリズムに用いる確率ネットワークの概念を説明する図面である。

【図5】本発明の実施例において対象とする走行経路の例を示す平面図である。

【図6】図5の走行経路に沿ったランドマークの見え方を例示するグラフである。

【図7】図5の走行経路についての確率ネットワークを示す線図である。

【図8】図7の確率ネットワークを標本空間に展開した線図である。

【図9】図8に展開されたバス毎のパフォーマンス計算

結果を表すグラフである。

【図10】本発明の自律走行車の別の実施例における走行車の構成を表すブロック図である。

【図11】図10の実施例における制御用計算機とその付属物の構成を表すブロック図である。

【符号の説明】

1 自律走行車

3 撮像装置

5 制御用計算機

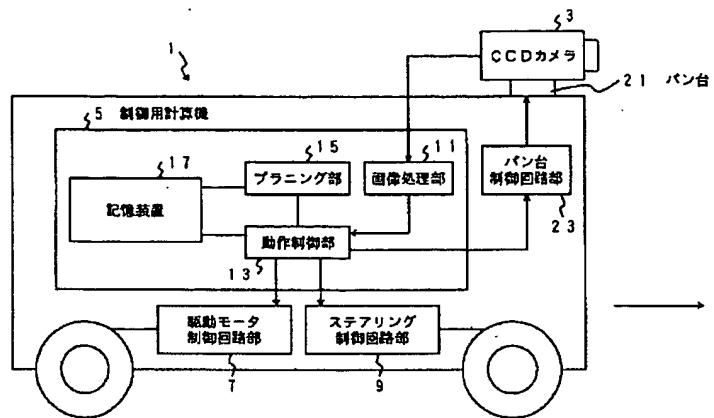
100 走行車の位置

101 障害物

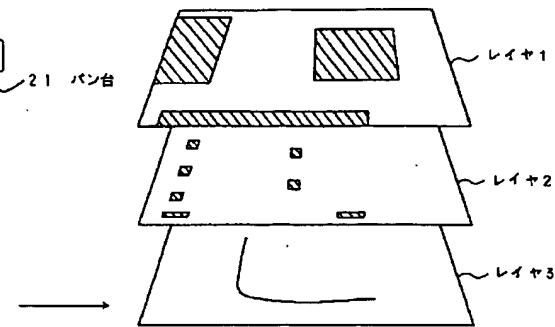
103 ランドマーク

105 教示経路

【図1】



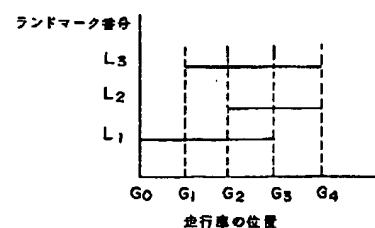
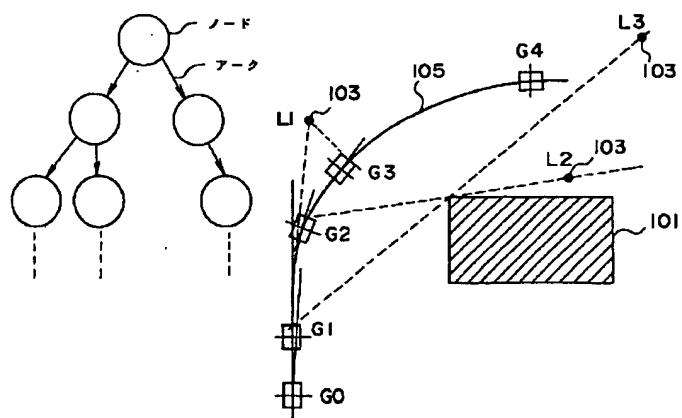
【図3】

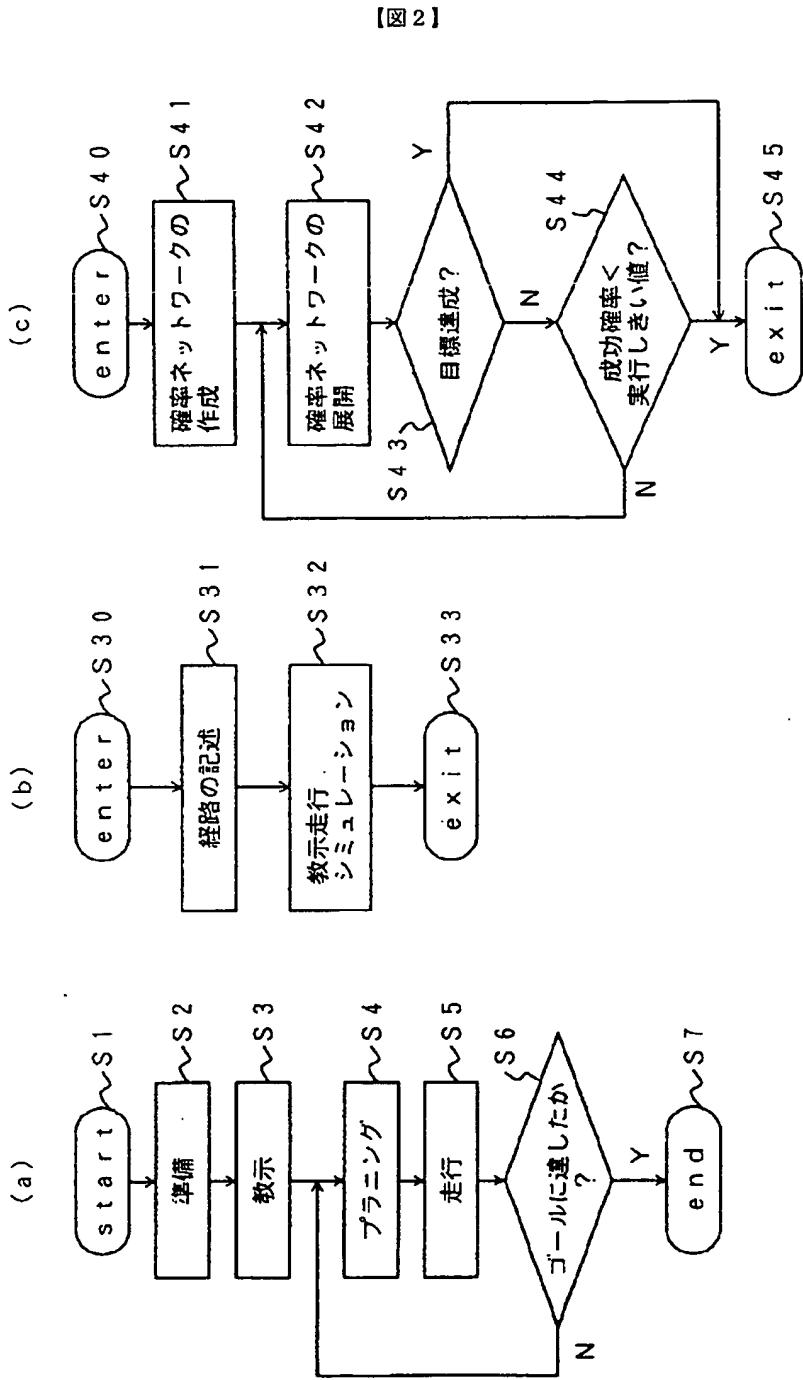


【図4】

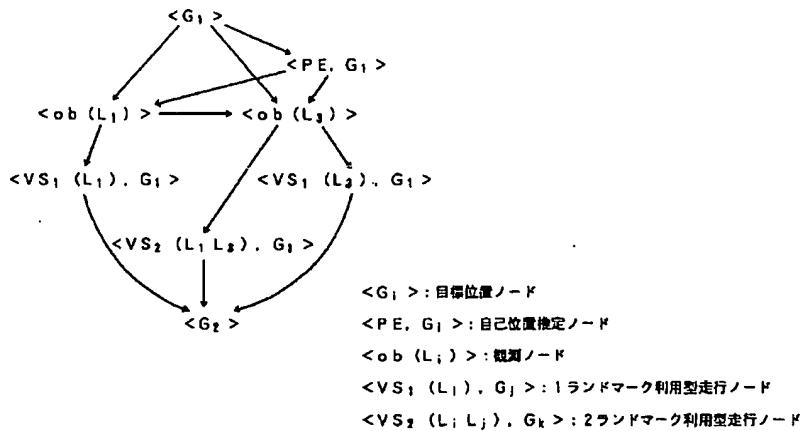
【図5】

【図6】

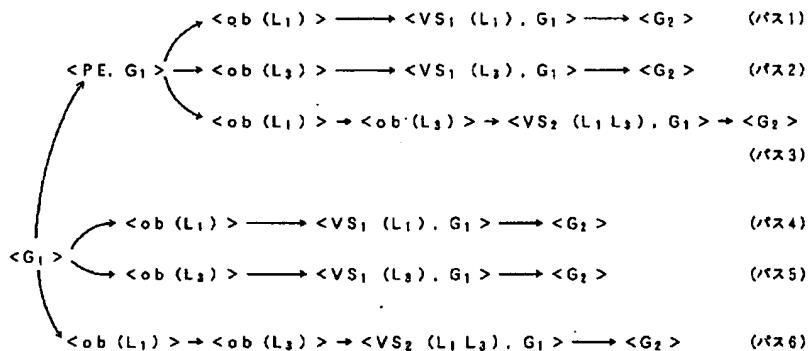




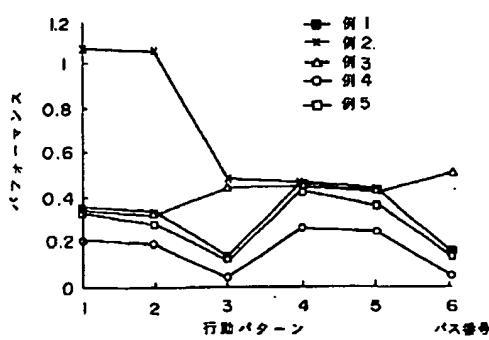
【図7】



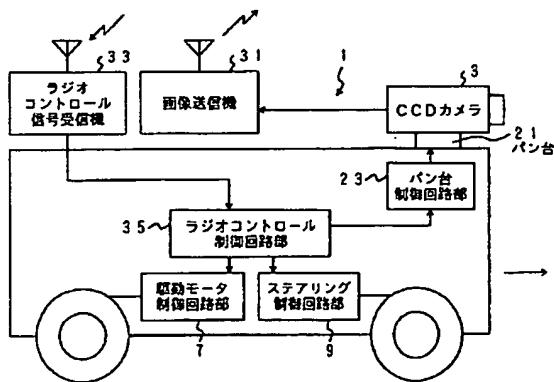
【図8】



【図9】



【図10】



【図11】

